



Your True Partner for
CAE × CFD
ICSC2016

IDAJ CAE
Solution
Conference



FLUENT在车辆风振计算中的应用



中国第一汽车技术中心 振动噪声研究室

演讲人：盛玲波

目录

■ 1 风振的概述

- 1.1 风振的物理现象
- 1.2 风振研究的工程意义

■ 2 风振的计算方法介绍

- 2.1 气动声学计算机理
- 2.2 风振计算网格模型
- 2.3 风振计算数学模型
- 2.4 风振计算难点

■ 3 利用FLUENT软件对风振开展的研究

- 3.1 风振的产生机理
- 3.2 计算设置对风振结果的影响
- 3.3 风振的影响因素

■ 4 风振优化实例

- 4.1 某三厢轿车前窗风振优化
- 4.2 某SUV天窗风振优化
- 4.3 其他优化措施

1. 车辆风振的概述



Your True Partner for
CAE × CFD

ICSC2016

IDAJ CAE
Solution
Conference

1.1 风振的物理现象

风振产生条件：

车速40-160km/h

天窗/侧窗开启

风振特点：

车辆风噪声的一种

乘员舱内的一种全局现象

低频高强度，频率一般为15-

20Hz，强度高达120dB以上

影响所有乘用车，客户抱怨多



120km/h风噪



**30-120km/h
加速后窗风振**

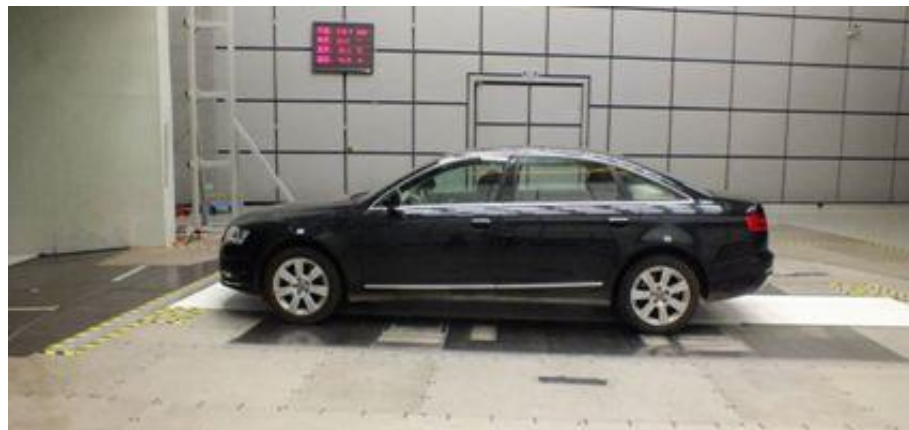


图1 车辆在风洞中试验

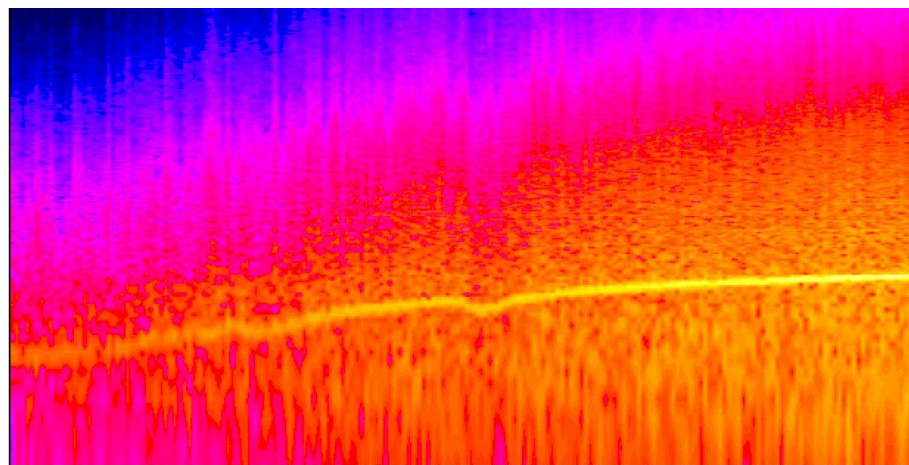


图2 车辆后窗开启状态下的colormap图

1.2 风振研究的工程意义

整车性能

一级目录

汽车造型

车内气味

噪声

振动

操纵性

动力性

经济性

舒适性

可靠性

安全性

保值性

环保性

耐久性

二级目录

道路

动力总成

声品质

风激励

刹车制动

通风空调

异响

三级目录

关窗风噪

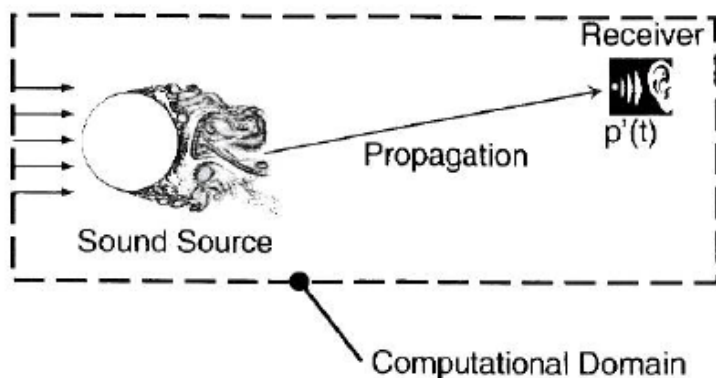
开窗风振

部件哨声

2. 风振的计算方法介绍

2.1 气动声学计算机理

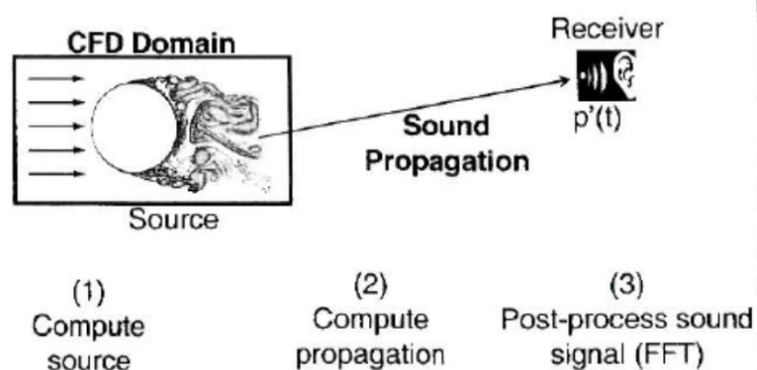
CAA Basics



- 对声源产生与声波传递同时进行计算
- N-S方程为整个计算的唯一控制方程
- 流体域需要覆盖整个声源与传递路径

SSPM Basics

Segregated Source-Propagation Methods

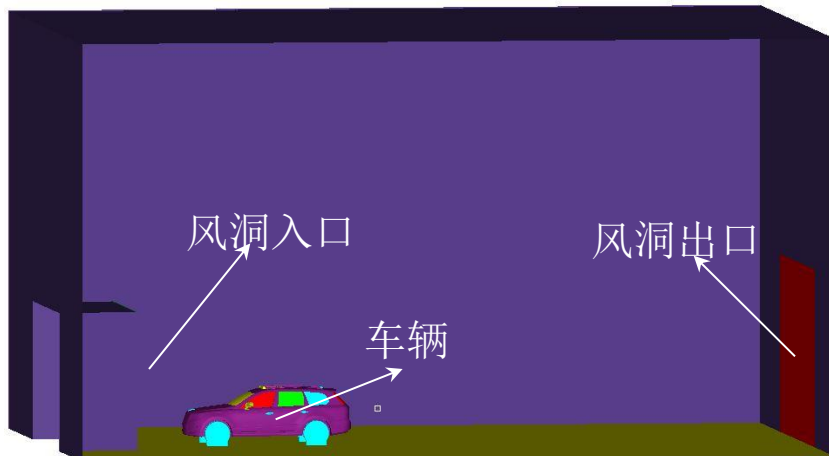


- 流体域只覆盖声源产生区域
- 两个现象的尺度差别很大：
幅值：湍流1kPa，声波1Pa
空间：湍流1um，声波1m
时间：湍流1us，声波1ms
- 声源产生与声波传递分别计算：
声源产生：N-S方程，流体CFD软件
声波传递：FW-H方程，声学软件

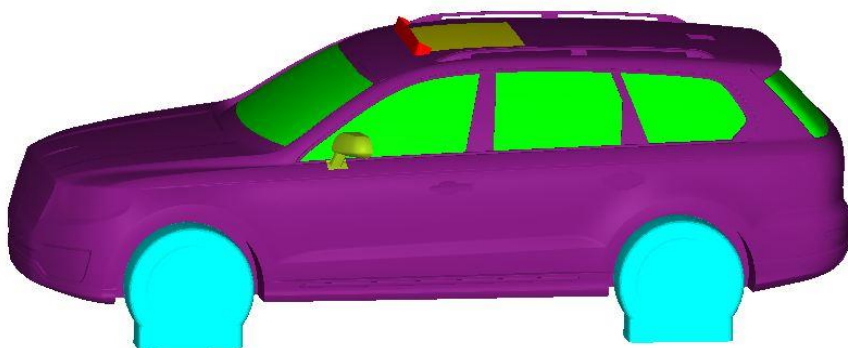
2. 风振的计算方法介绍

2.2 风振计算网格模型

风洞模型（依据同济大学地面风洞尺寸）



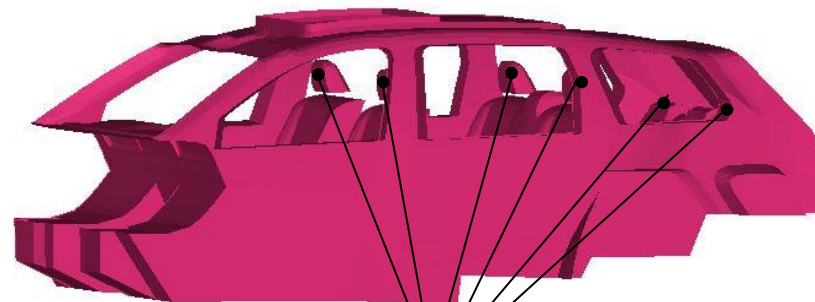
车身外表面模型



网格纵剖面（对不同区域局部优化）



车身内表面模型



车内布置6个监测点
(近似的位于头枕中心点前方15cm处)

2. 风振的计算方法介绍

2.3 风振计算数学模型

几种主要的CFD计算方法

■ Direct Numerical Simulation (DNS)

对所有尺度的湍流进行求解

当有复杂几何与复杂流体时，计算成本昂贵，目前很少用于工程计算中

■ Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS)

流动变量分成时均值和波动值两个部分，由此导致出现雷诺应力等脉动关联项，需要采用湍流模型进行封闭大的涡团受流动因素影响很大，因此对于不同的流动需要采用不同的湍流模型。

■ Large Eddy Simulation (LES)

通过直接求解瞬态控制方程计算只比网格尺度大的湍流，小尺度的涡对大尺度涡运动的影响则通过建立亚格子模型来模拟；可模拟湍流发展过程中的细节，虽对计算机要求仍比较高，但大大低于DNS，目前已广泛用于工程计算中

■ Detached Eddy Simulations (DES)

在远离壁面的区域采用大涡模拟的方法，在靠近壁面的区域用大涡模拟的方法避免了需要在壁面附近布置大量网格的要求，兼顾了LES和RANS两者的长处

参数设置

■ 确定问题关心得最大频率 $f_{\max}$

■ 确定网格尺寸 (1. 受几何因素限制 2. 受最大频率限制)

$$\text{最小网格尺寸} <= \frac{c}{10f_s} = \frac{c}{20f_{\max}}$$

■ 确定时间步长 (1. 受计算频率限制 2. 受最小网格尺寸限制)

$$\text{步长} \Delta t <= \frac{1}{2f_{\max}} \<= \frac{l_{\min}}{v_{\text{aver}}}$$

2.4 风振计算难点

- 所有的气动声学问题都是非稳态的
- 需要对较小尺度的涡进行捕捉
- 问题所关心的频率高，风振一般关心到200Hz
- 计算域需要覆盖整个流场，计算量大
- 声波所携带的能量只占整个流动能量的极小部分. (波音747飞机起飞辐射的声能不足以煮熟一个鸡蛋)
- 声压的幅值相对于流体流动压力幅值而言很小，因此计算需要采用高阶离散格式 (At SPL=80dB, $\sim 0.2\text{Pa}$, compared to average sea-level pressure 101325 Pa)
- 高频流动现象难以捕捉
 - 高频=短波长=高质量网格
 - 高频=高的采样频率=短的时间步长=多的迭代次数
- 几何模型为真实车辆模型，几何复杂，处理困难

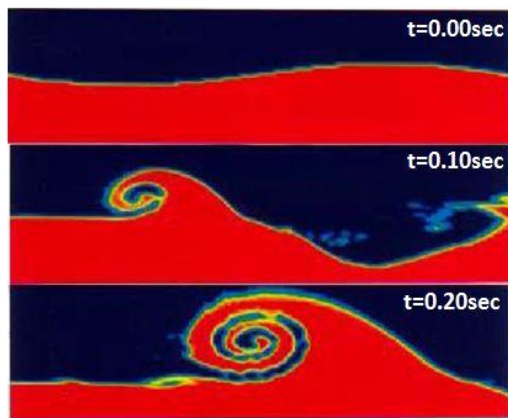
3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.1 风振的产生机理

研究背景：风振机理不明

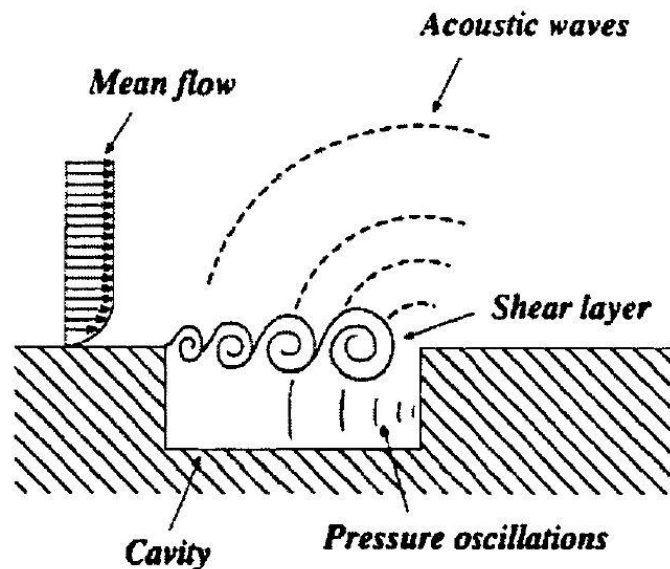
学术界对“风振的产生机理为亥姆赫兹共振”的认识不统一

剪切层的不稳定性



图为An等人开展的实验。蓝色为油，下层为水。
速度差小时，形成稳定界面；
速度差达到一临界值后，界面不稳定，一非常小的扰动会导致稳定的界面破坏并伴随着涡的形成。

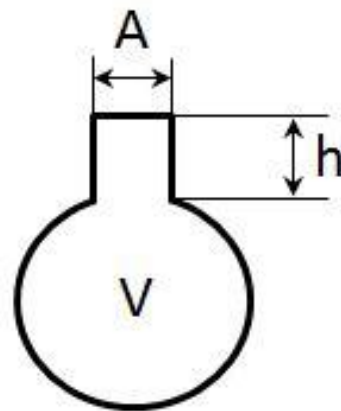
脱落涡的反馈机理



涡周期性脱落频率f:

$$\frac{n}{f} = \frac{L}{U_c} + \frac{L}{a_0}, \quad n=1,2,3\dots$$

亥姆赫兹共振



车厢空间类比为图中的V，开窗面积类比为图中的A，而开窗部位的深度则类比为图中的h

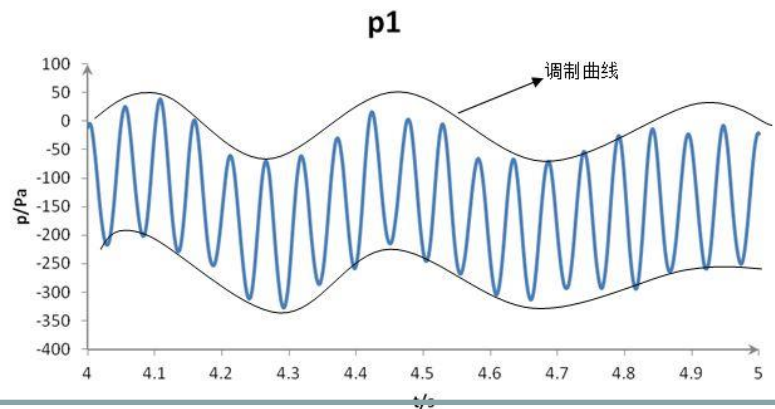
共振频率f₀:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{Vh}}$$

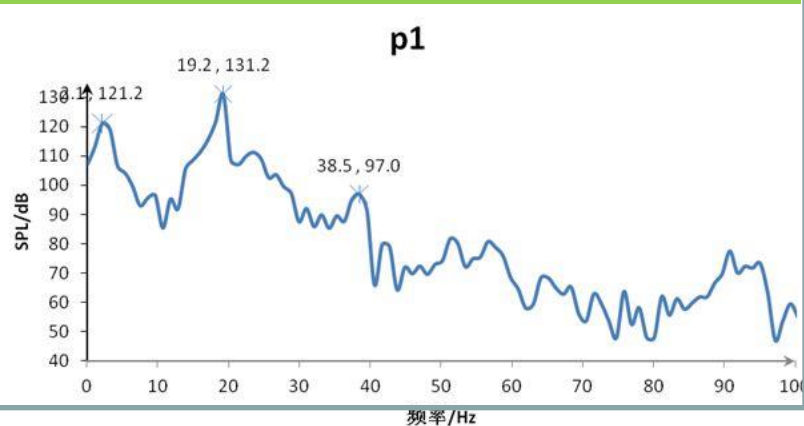
3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.1 风振的产生机理

风振时域曲线

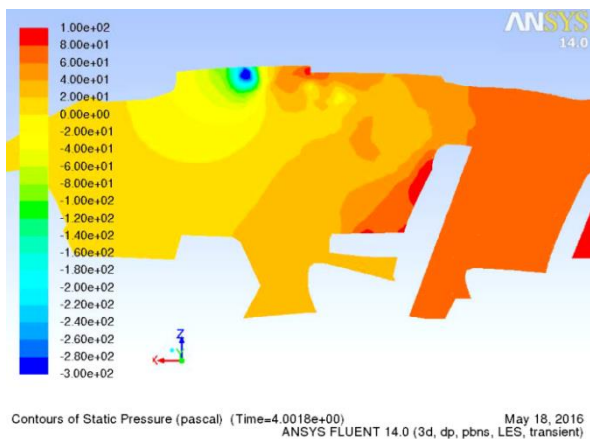


风振频谱曲线

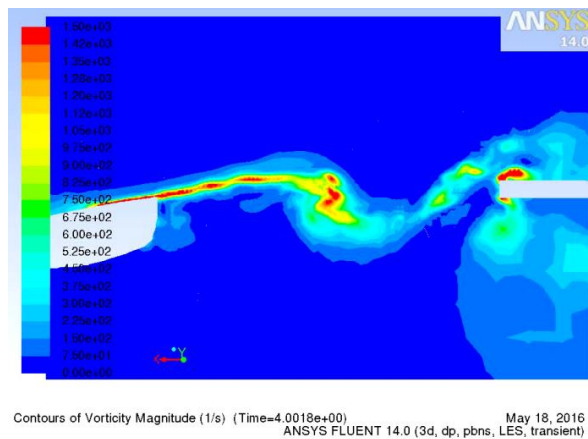


以某款SUV为研究载体

风振声压云图

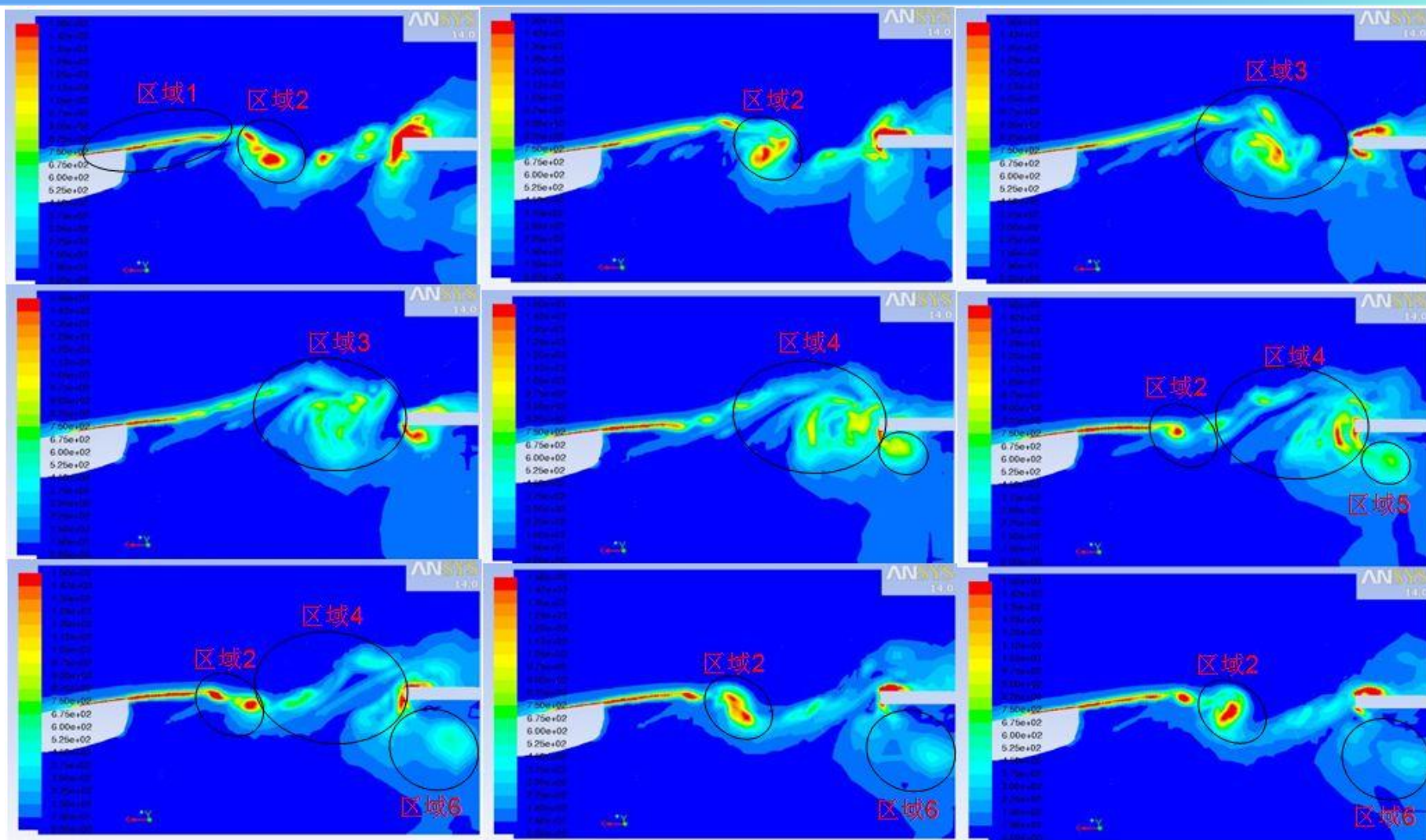


风振涡量云图



3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.1 风振的产生机理

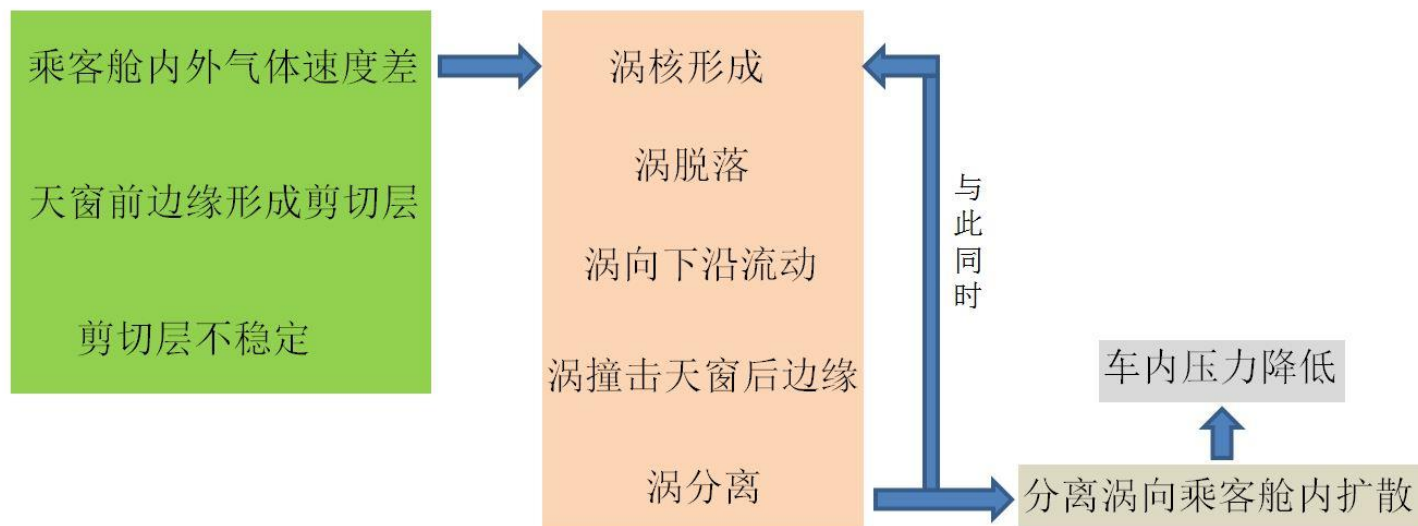


3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.1 风振的产生机理

周而复始的周期为 $T \approx 0.4926s - 4.8416s = 0.051s$

频率 $f = 1/T = 19.6Hz$



风振的产生机理是：乘客舱内外气体速度差导致剪切层的产生，剪切层在速度达到一临界值后，出现扰动并形成脱落涡，脱落涡随着流体运动撞击到车窗的后边缘进而分离，一部分分离涡进入乘客舱，且将自身携带的低压信号一同带入车内，引起车内压力下降

3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.2 计算设置对风振结果的影响

气体可压缩与不可压缩设置对计算结果的影响

背景介绍：

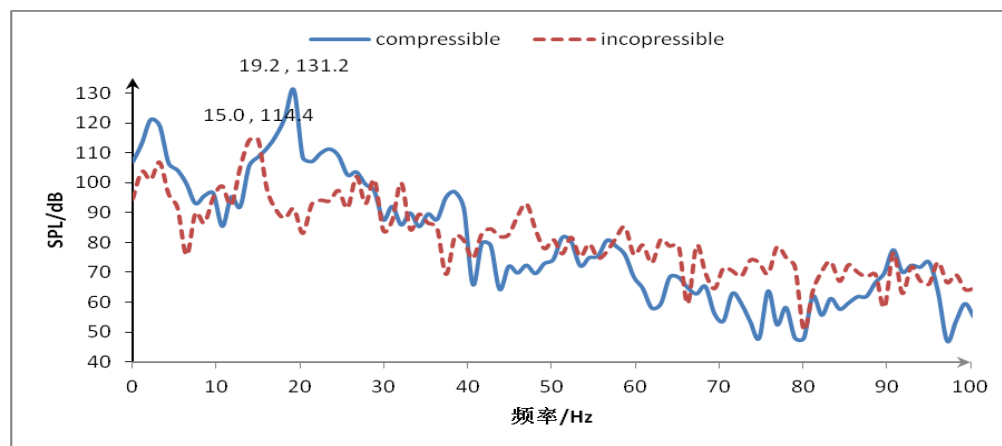
◆计算流体力学中，对于气体的处理，常有两种方法，不可压缩和可压缩

◆在Ma小于0.3时，将气体视作是不可压缩的，以加快计算速度

车辆Ma在0.05—0.1之间

是否可用不可压缩计算？

同样以某款SUV为研究载体 车速70km/h



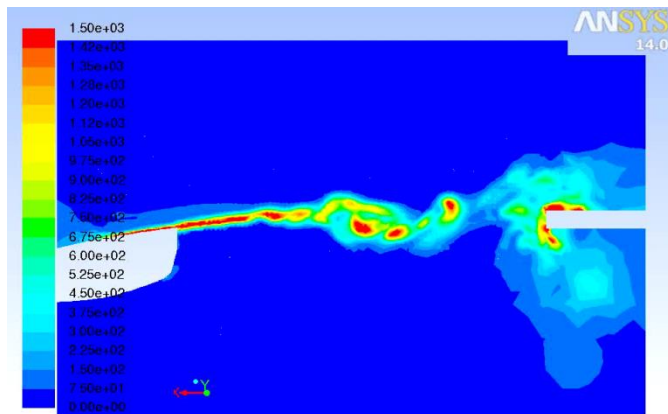
两种设置情况下的风振频谱曲线

气体的不可压缩设置计算
无法捕捉风振现象！

3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.2 计算设置对风振结果的影响

气体可压缩与不可压缩设置 对计算结果的影响



风振涡量云图

- ◆同样存在脱落涡的运动
- ◆分离涡不能向车厢内扩散
- ◆周期比可压缩的长

结论：

- (1) 不可压缩流体的设置虽然可以给传统的计算流体力学带来更快的计算速度，但对风振的计算却并不奏效；
- (2) 不可压缩求解的结果中，也产生了一个峰值，但这个峰值比可压缩的小，发生的频率也比可压缩的低；
- (3) 不妨假设，由于不可压缩设置，声波无法传递，在天窗后缘产生的声波无法反馈至天窗前缘，因而不能作为扰动激励破坏剪切层，故而导致峰值的大小与所在频率都比可压缩设置状况下的小。

3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.2 计算设置对风振结果的影响

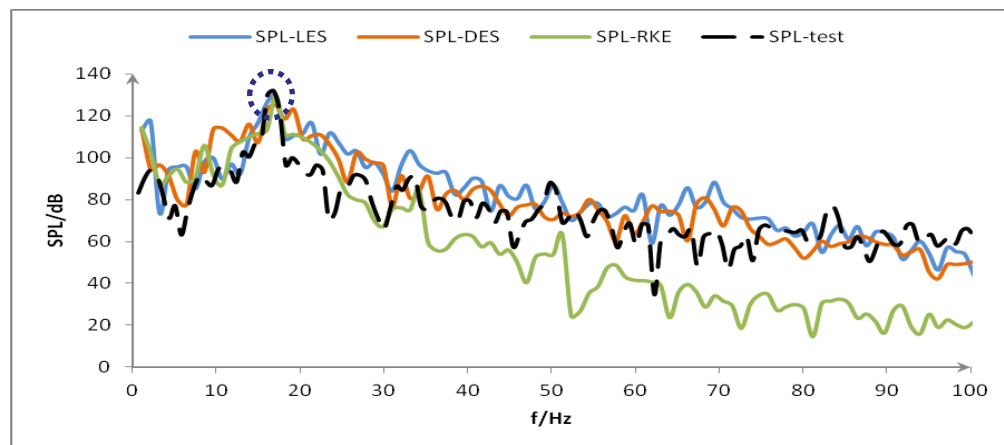
CFD计算模型设置 对计算结果的影响

背景介绍：

- ◆ LES、DES、k-e是流体力学中常用的三种对N-S方程简化的计算模型；
- ◆ LES求解复杂，k-e求解简便，DES介于两者之间；
- ◆ 目前学术界普遍采用LES作为求解风振现象的工具。

**k-e在风振求解中的表现
究竟如何？**

以某款三厢轿车为载体 车速100km/h
左后窗开启状态下的风振



三种计算模型求解的风振频谱曲线

三种模型都能够在关心的频率处获得与试验
相近的峰值！

3. 利用FLUENT对风振开展的研究

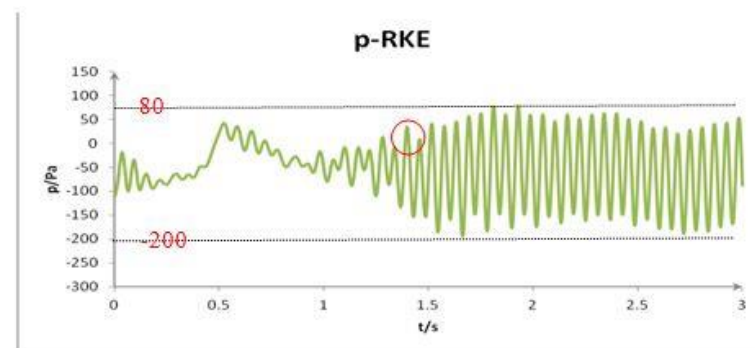
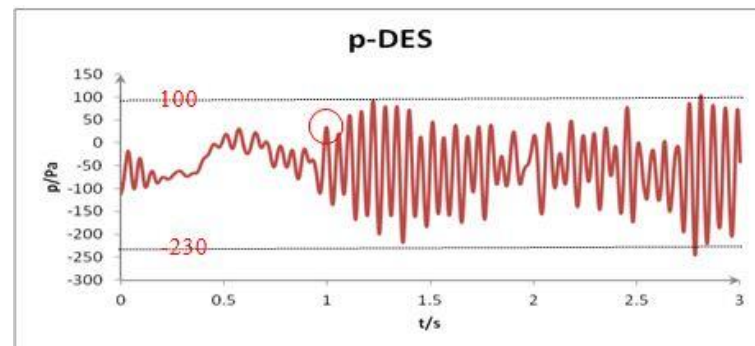
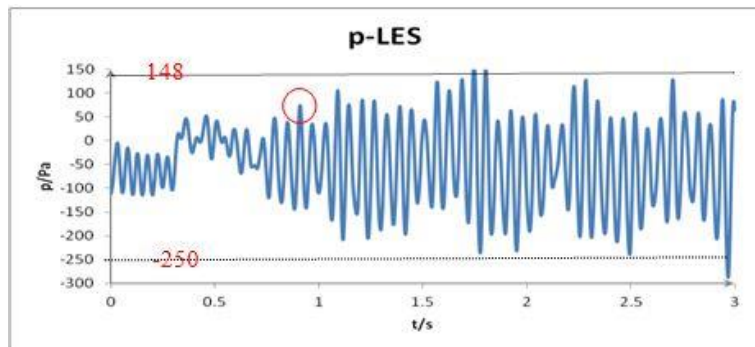
3.2 计算设置对风振结果的影响

CFD计算模型设置 对计算结果的影响

	风振强度 (dB)	偏差 (%)	风振频率 (Hz)	偏差 (%)	总CPU时间 (h)	实际需要的CPU时间 (h)
试验	132.09		16.85			
算法LES	129.46	-2.0	17.1	1.5	138	81
算法DES	124.94	-5.4	17.1	1.5	100	67
算法RKE	130.00	-1.6	17.1	1.5	89	70

结论：

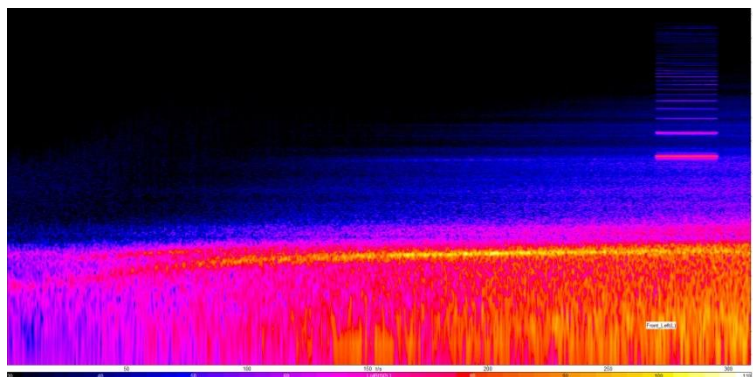
- ◆ 计算精度方面， $RKE \approx LES > DES$ ；
- ◆ 计算速度方面， $DES \approx RKE > LES$ ；
- ◆ 在遇到时间相对苛刻的情况下，完全可以用比较简单的RKE模型代替常用的LES模型来计算风振。



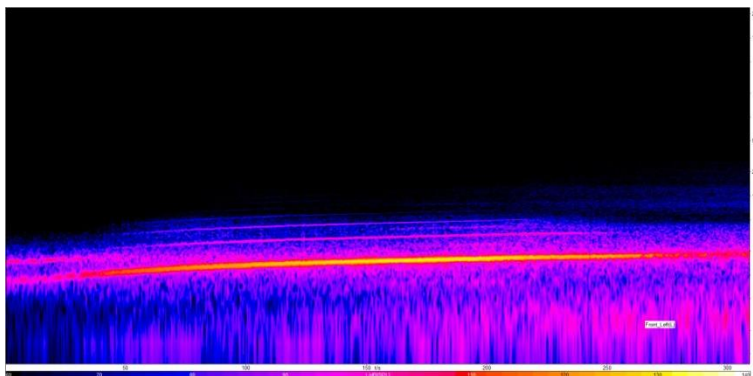
3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.3 风振的影响因素—速度的影响

试验车在风洞中表现出来的风振与速度之间的关系

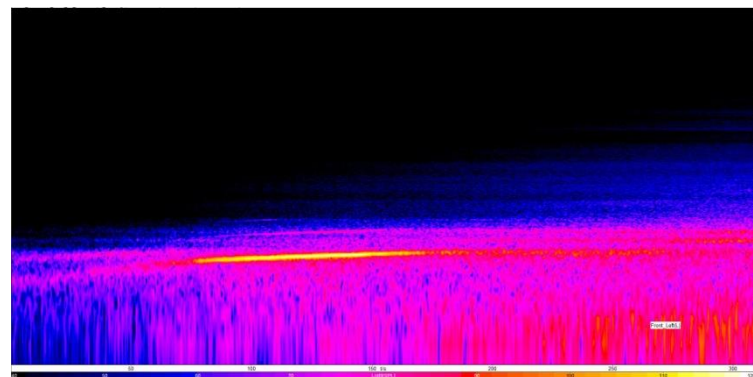


某高端车20-100km/h加速过程中天窗风振

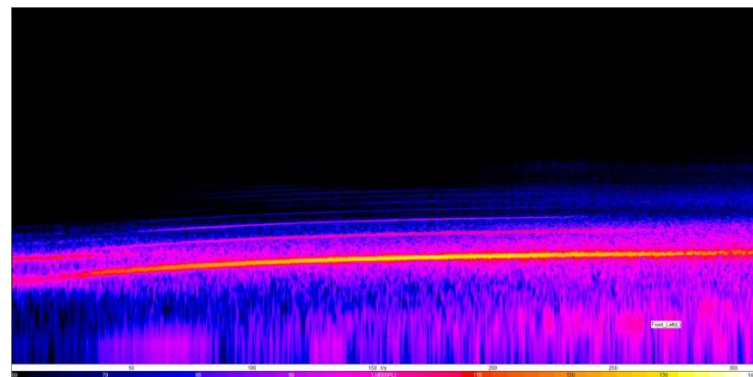


某高端车40-100km/h加速过程中后窗风振

呈现出明显的速度相关性



某A级车20-100km/h加速过程中天窗风振

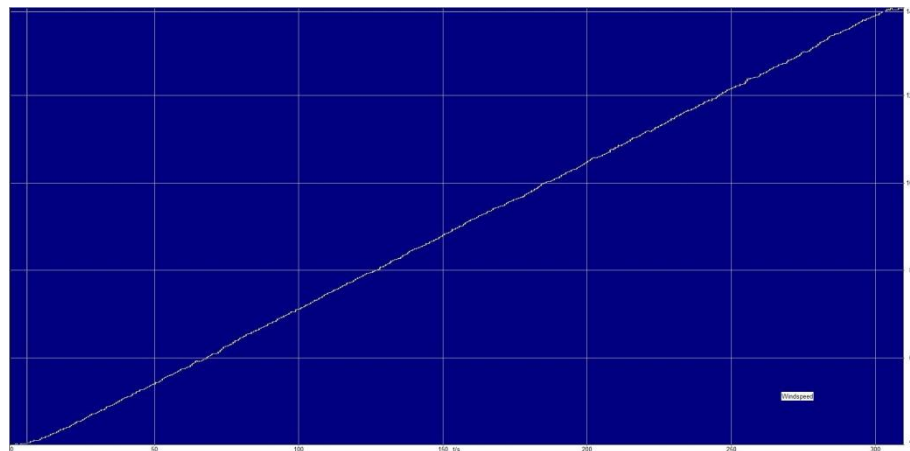


某A级车40-100km/h加速过程中后窗风振

3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.3 风振的影响因素—速度的影响

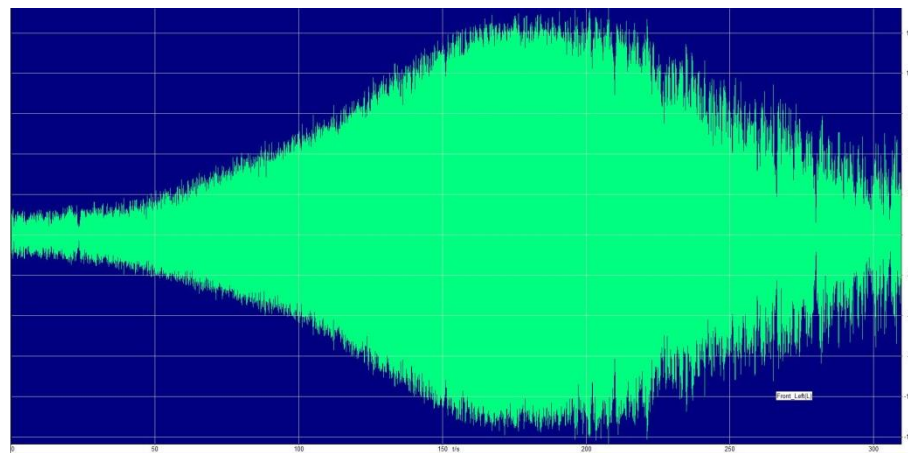
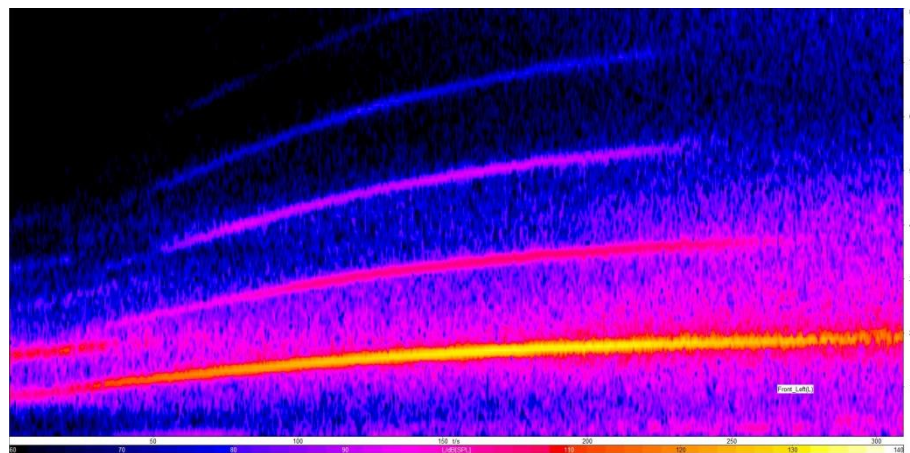
以该A级车40-140左后窗风振为例分析



结论：

随着速度的增大，风振的频率和幅值都会有所增加，且频率与声压幅值都呈近线性的增长；

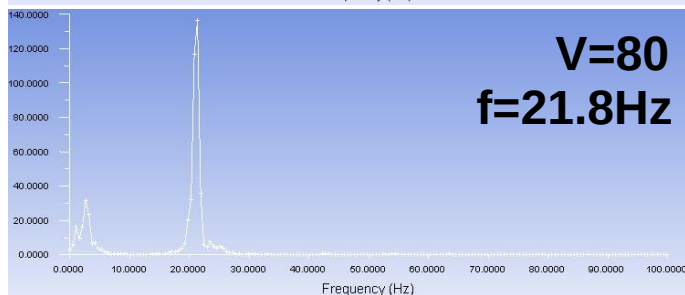
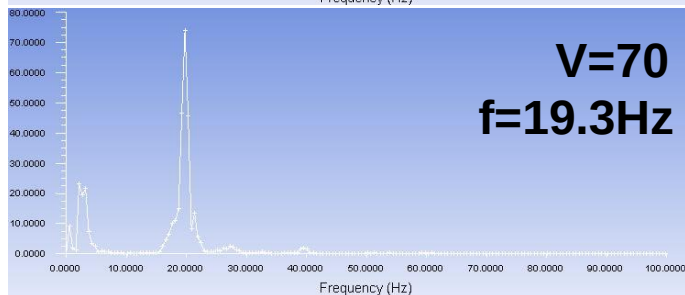
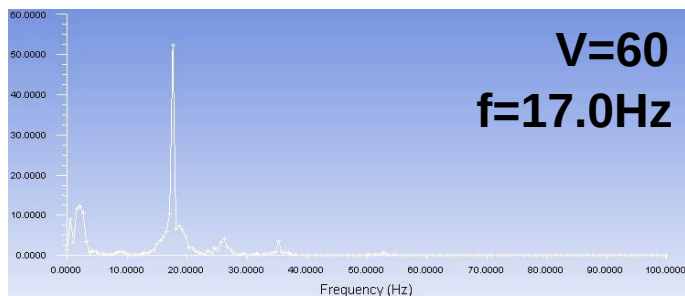
但当速度达到一临界值100km/h后，风振的频率则几乎保持不变，而声压幅值开始将近线性的减小。



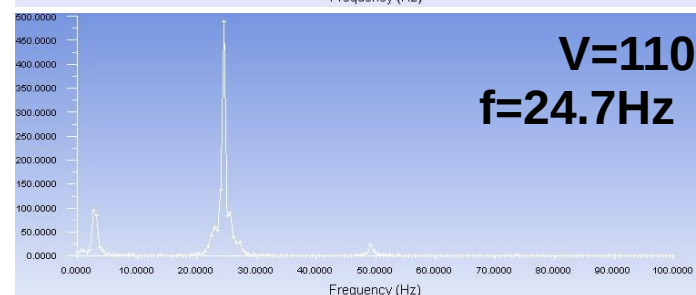
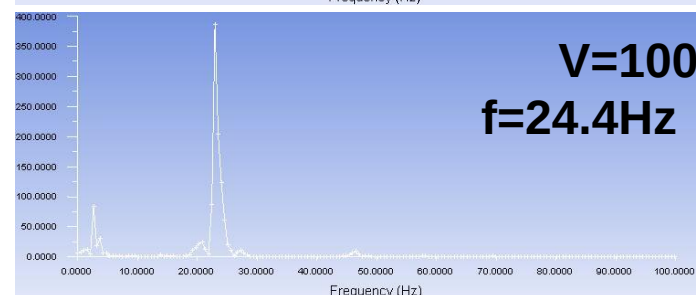
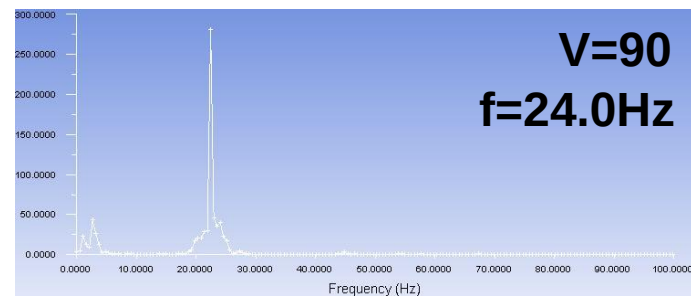
3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.3 风振的影响因素—速度的影响

利用仿真手段模拟风振与速度之间的关系



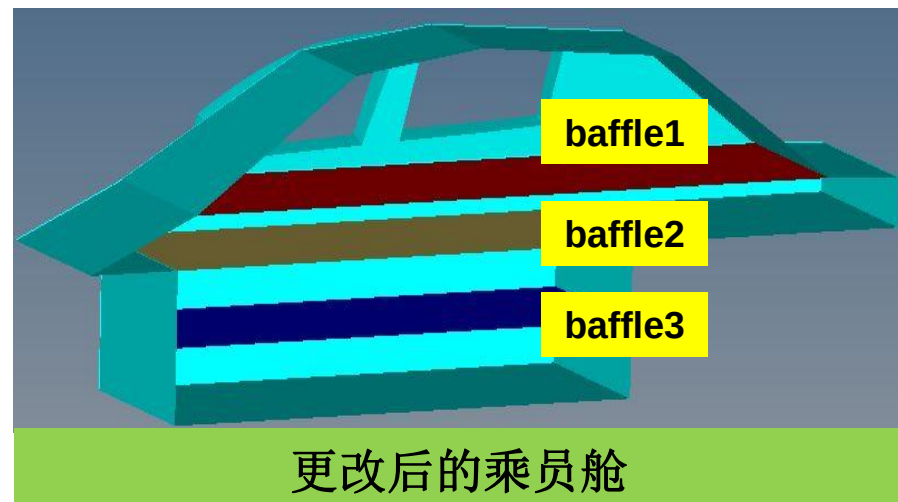
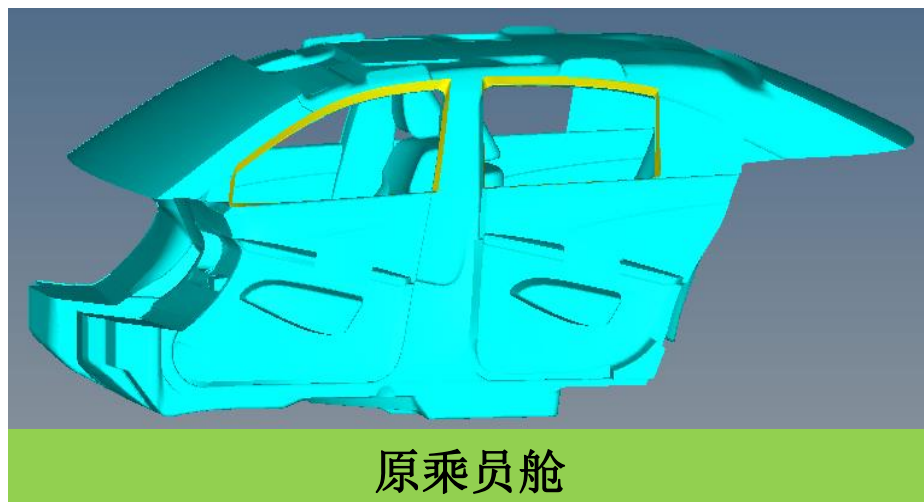
结论：
速度小于30km/h，
不产生风振；
速度40–90km/h，风
振频率随速度呈近
线性增加趋势；
速度大于100km/h
时，风振频率几乎
保持不变；
不得不提到，在速
度特性的仿真过程
中，随着速度的继
续增大，不会如试
验那样，风振现象
消失！



3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.3 风振的影响因素—乘员舱体积的影响

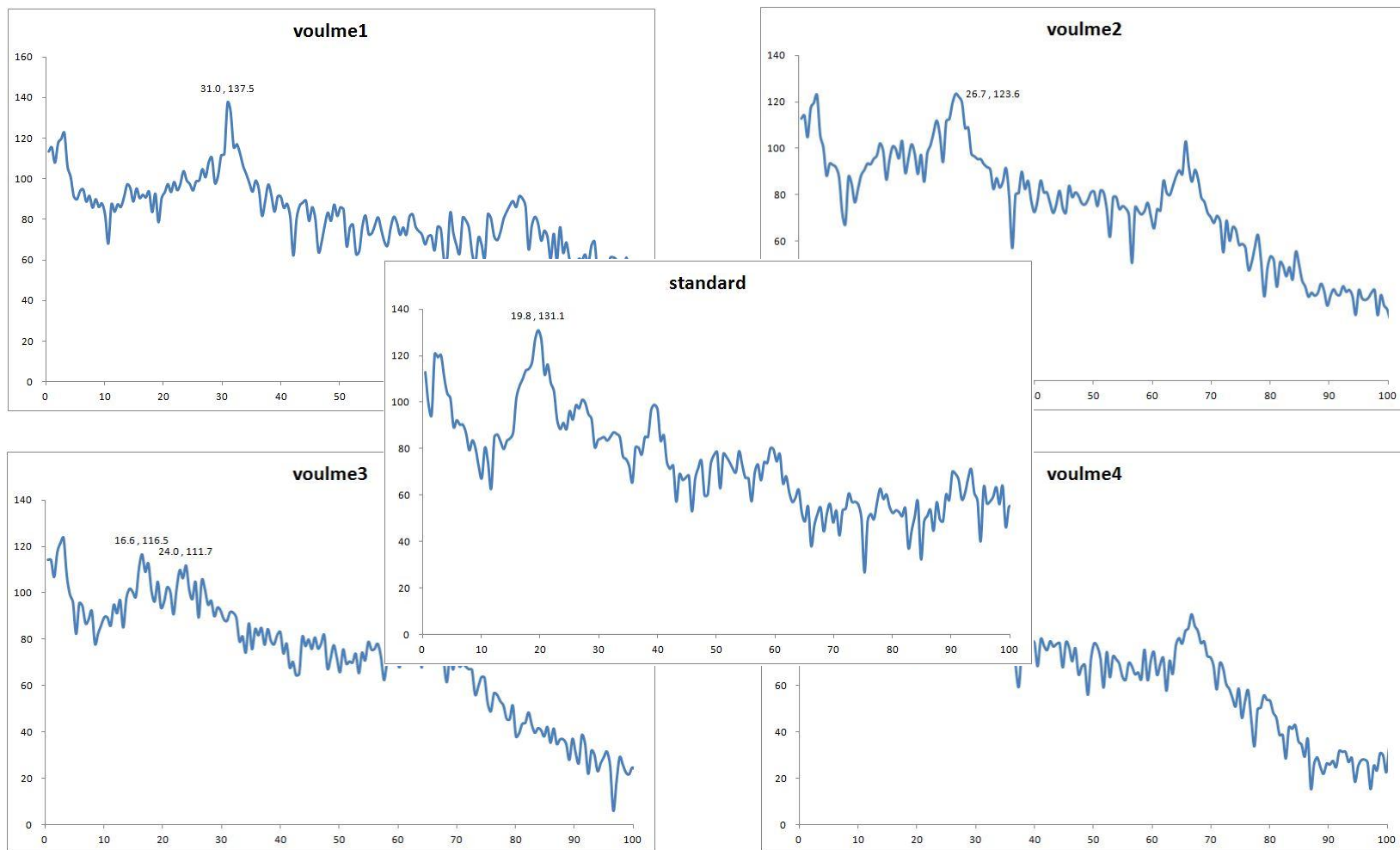
同样以该SUV为研究载体 车速70km/h



原乘员舱		体积2.70m ³
Volume1	baffle1、baffle2、baffle3均关闭	体积1.27m ³
Volume2	baffle1开启, baffle2、baffle3关闭	体积2.20m ³
Volume3	baffle1、baffle2开启, baffle3关闭	体积3.12m ³
Volume4	baffle1、baffle2、baffle3均开启	体积3.91m ³

3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.3 风振的影响因素—乘员舱体积的影响



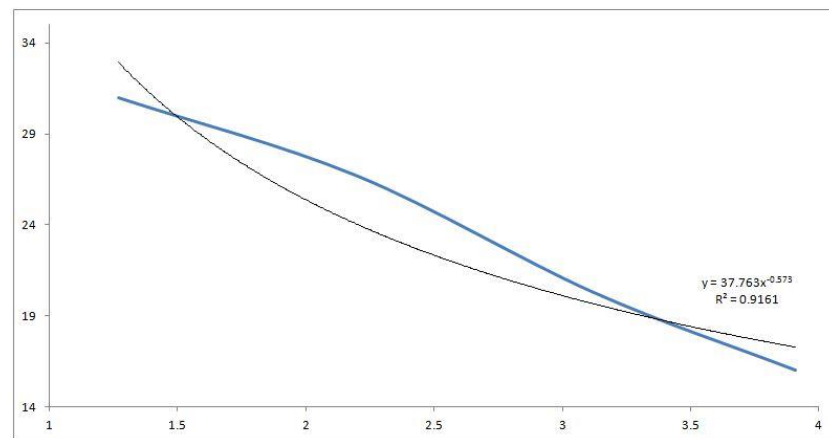
3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.3 风振的影响因素—车窗开度大小的影响

结论：

- (1) 乘员舱的体积对风振有着明显的影响；
- (2) 随着乘员舱体积的增大，风振的频率与幅值都会随之下降；
- (3) 对频率—体积进行曲线拟合，风振的频率与体积的-0.573次方相关；
- (4) 亥姆赫兹公式中，风振的频率与体积的-0.5次方相关，由此可以产生假设，风振是一个受亥姆赫兹公式影响的现象

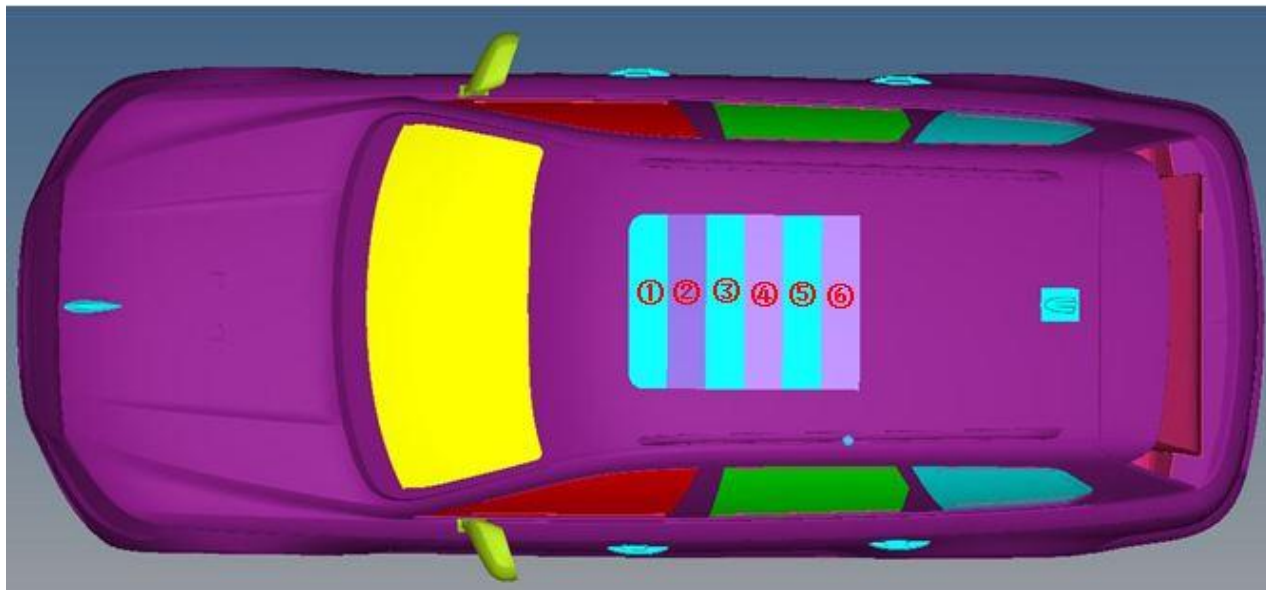
	峰值/dB	频率Hz	体积
原乘客舱	131.1	19.8	2.70m ³
volume1	137.5	31.0	1.27m ³
volume2	123.6	26.7	2.20m ³
volume3	117.2	20.3	3.12m ³
volume4	113.6	16.0	3.91m ³



3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.3 风振的影响因素—车窗开度大小的影响

同样以该SUV为研究载体 车速70km/h



某款SUV俯视图

roof1 : ①

roof2 : ①②

roof3 : ①②③

roof4 : ①②③④

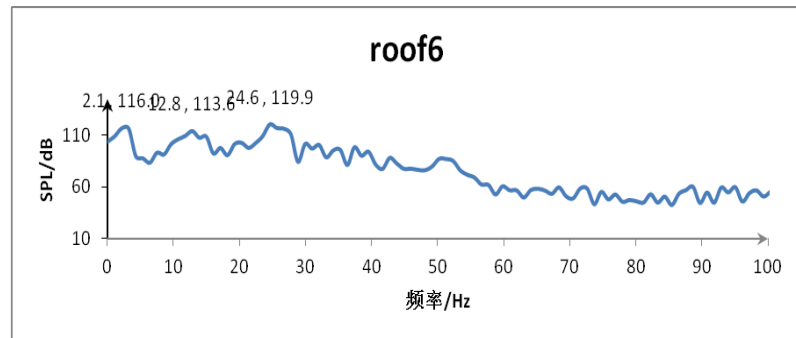
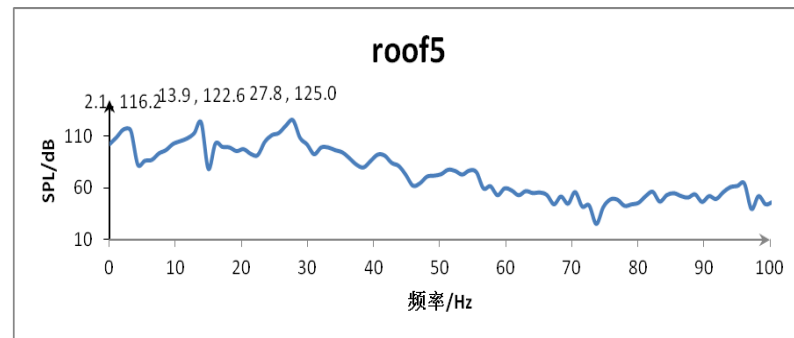
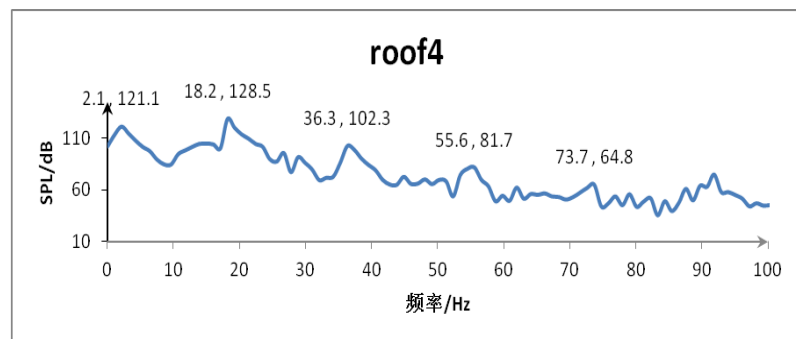
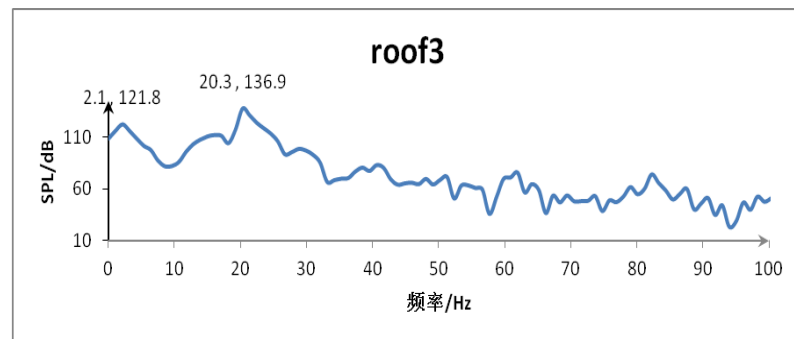
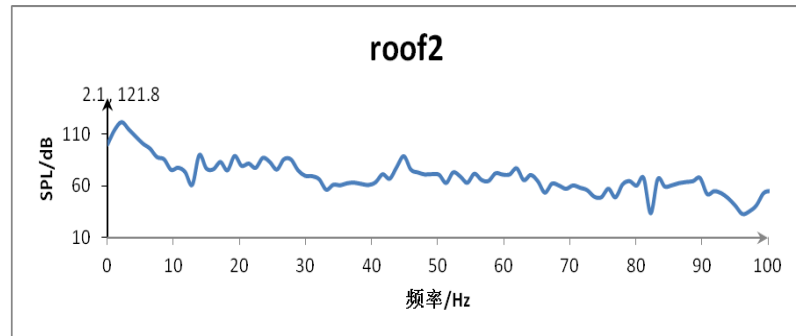
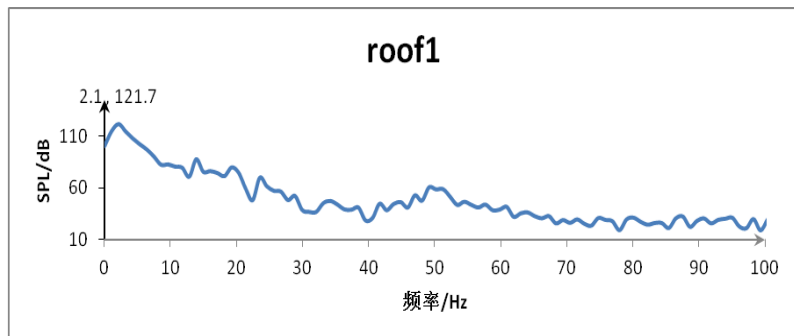
roof5 : ①②③④⑤

roof6 : ①②③④⑤⑥

监测点布置如前文

3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.3 风振的影响因素—车窗开度大小的影响



3. 利用FLUENT对风振开展的研究

3.3 风振的影响因素—车窗开度大小的影响

结论：

（1）天窗在开度1和开度2的情况下，不会产生风振，在开度3和开度4的情况下风振很明显，在开度5和开度6的情况下，风振又趋于消失。很明显的，风振是一个与天窗开度大小息息相关的一个现象；

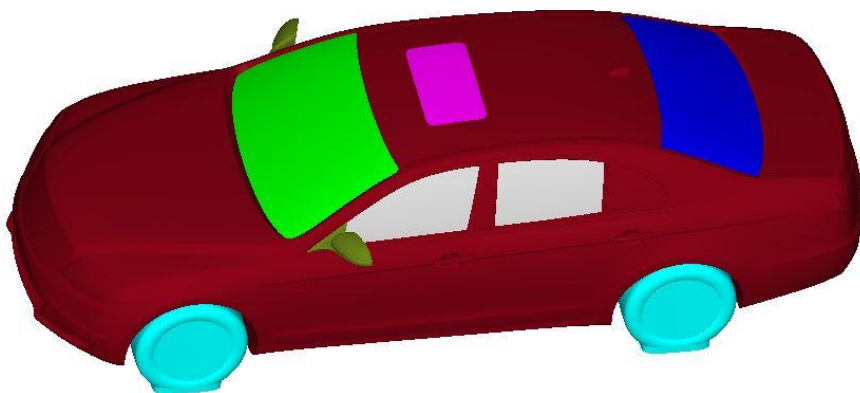
（2）从计算结果来看，风振的产生机理不应该是亥姆赫兹共振，而前面提到的涡脱落理论则能更好的解释结果。

	峰值/dB	频率Hz
天窗开度1		
天窗开度2		
天窗开度3	136.9	20.3
天窗开度4	128.5	18.2
天窗开度5	122.6	13.9
天窗开度6	113.6	12.8

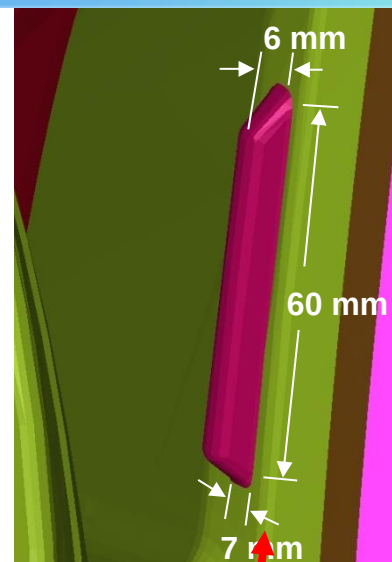
4. 风振优化实例

4.1 某三厢轿车前窗风振优化

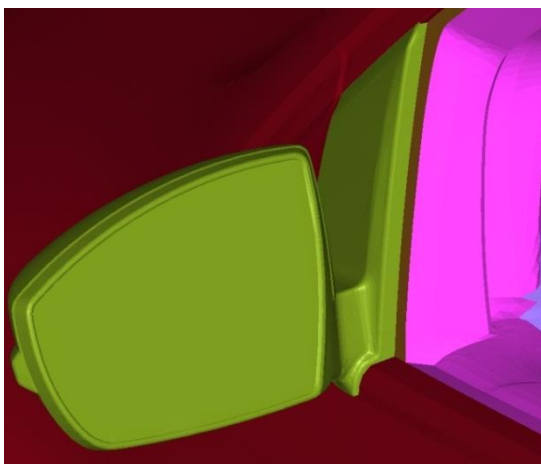
以某款三厢轿车为例



扰流板尺寸:
高度: 6 mm
宽度: 7 mm
长度: 60 mm

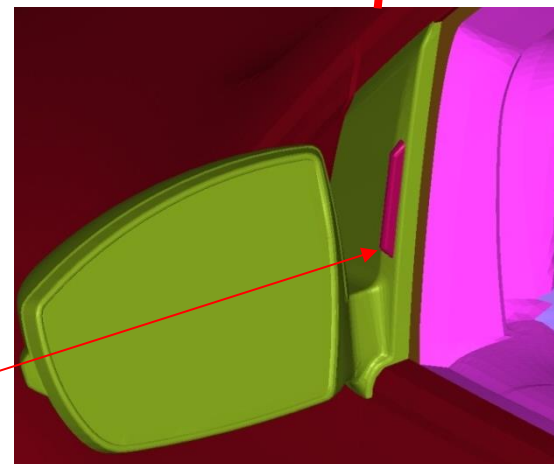


原设计



更改后设计

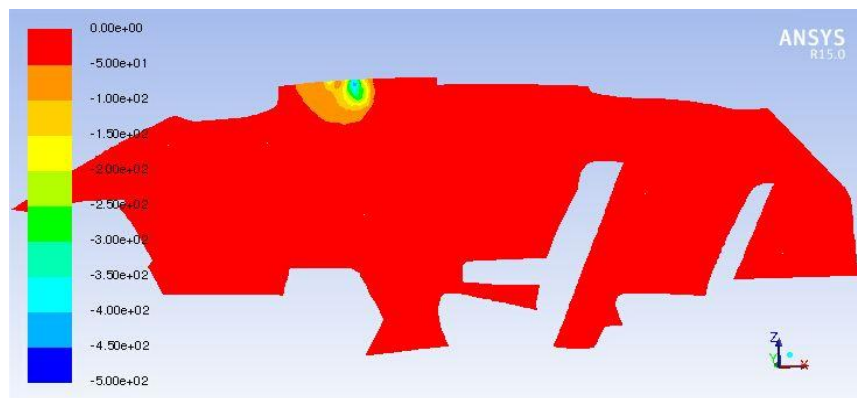
为降低前窗风振
提出一个小扰流
板的设计



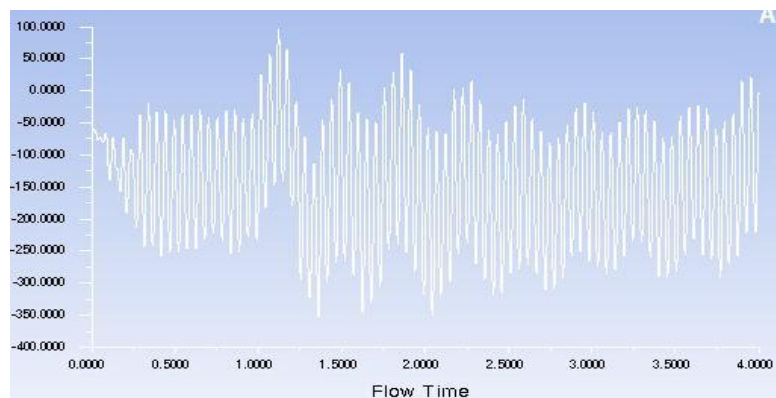
4. 风振优化实例

4.2 某SUV天窗风振优化

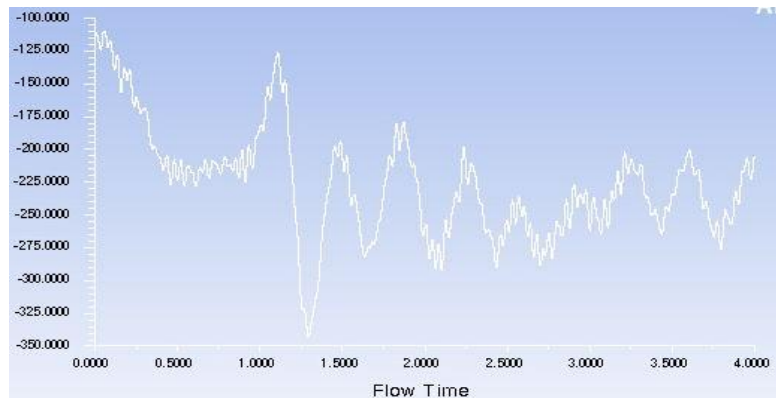
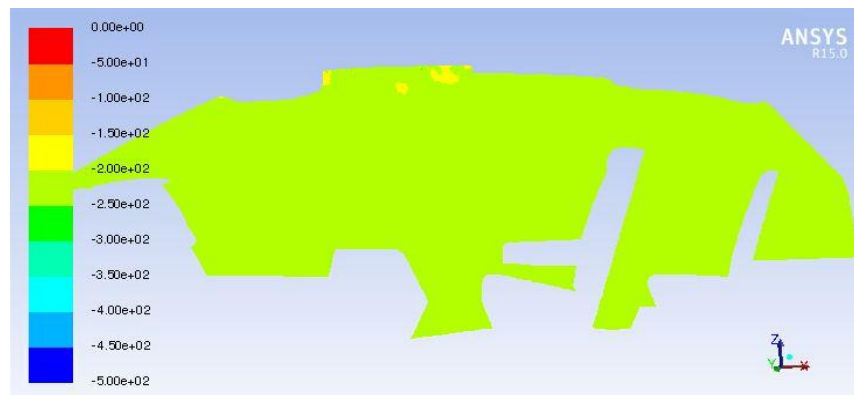
T=4s时刻车厢内部静压云图（纵向剖面）



监测点1处的静压力—时间曲线

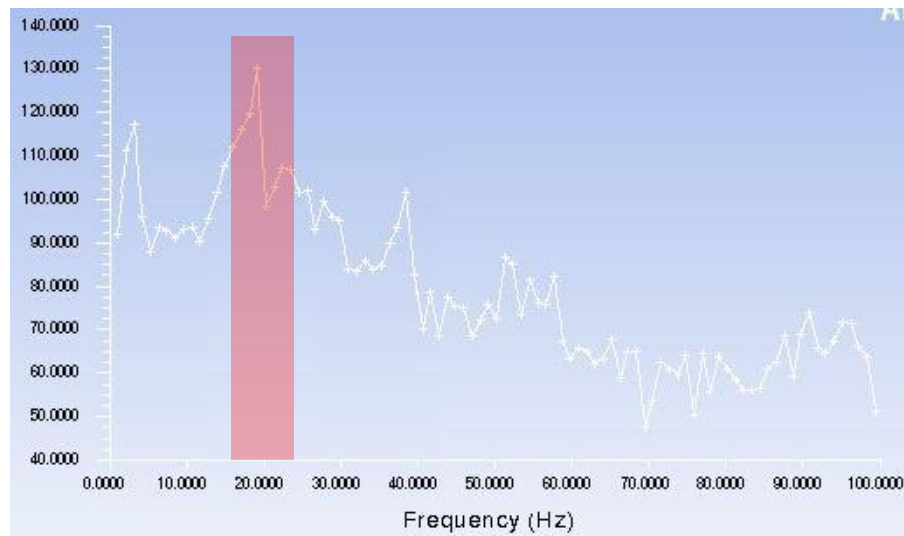


有扰流板

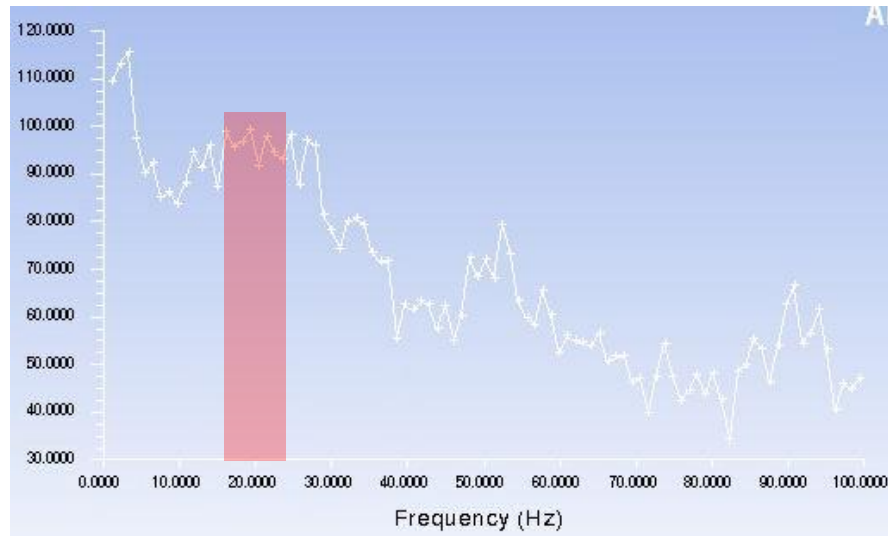


4. 风振优化实例

4.2 某SUV天窗风振优化



无扰流板



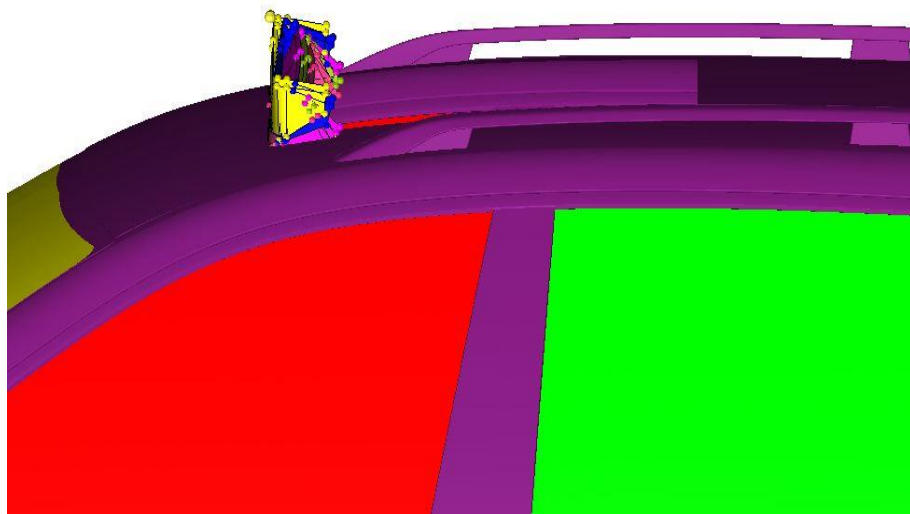
有扰流板

结论：
无扰流板时，在18.5Hz附近时，声压级曲线有明显的单峰，约133dB，此即为风振现象；
有扰流板时，在相应的频率附近，不再有这样的单峰，且最大幅值降低到102dB左右；
现设计的扰流板起到了很好的抑制风振的作用！

4. 风振优化实例

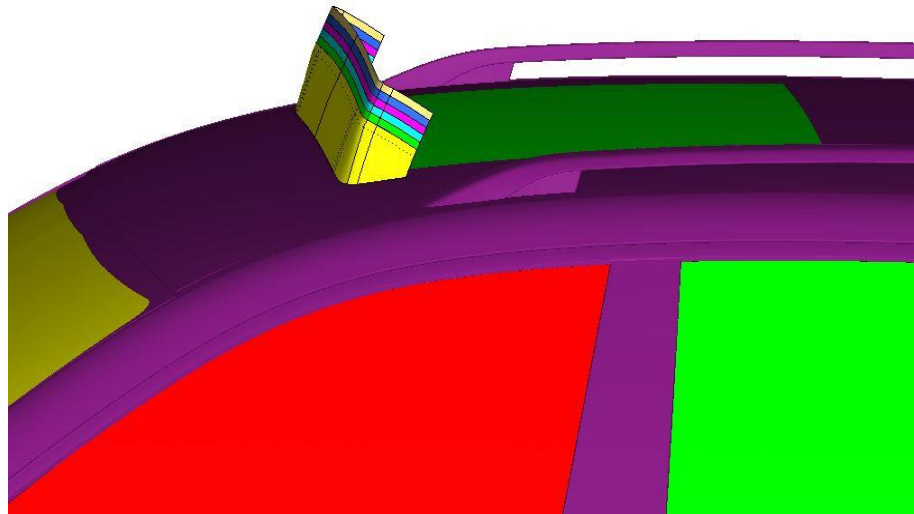
4.2 某SUV天窗风振优化

导流板角度优化



寻找降低风振的最优角度

导流板高度优化



在最优角度下，寻找合适高度

4.2 某SUV天窗风振优化

扰流板不同角度下的风振结果

扰流板安装角度	0-1000Hz噪声总声压级/dB
0°	122.44
10°	125.73
20°（原设计）	120.62
30°	124.85
40°	125.65
50°	129.46

扰流板不同高度下的风振结果

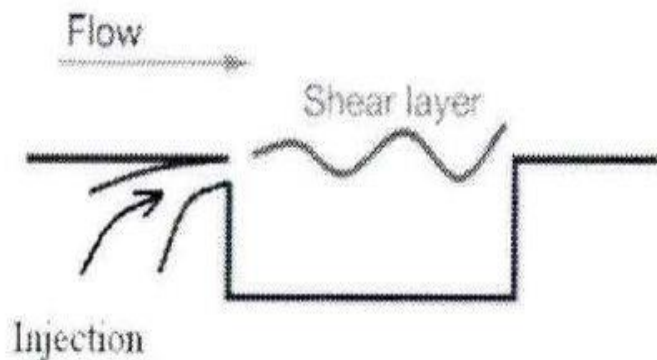
扰流板安装角度	0-1000Hz噪声总声压级/dB
60mm	124.19
70mm	124.67
80mm	122.84
90mm	120.62
100mm（原设计）	123.19

结论:保持现有扰流板的角度不变,降低高度10mm

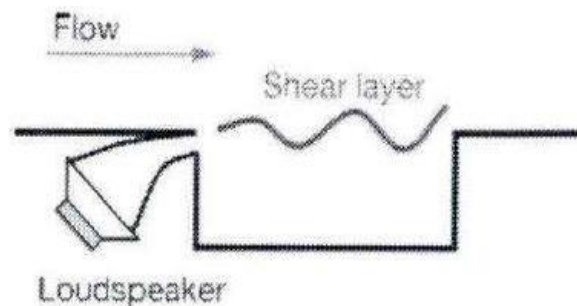
4.3 其它优化措施

风振的主动控制方法：

- 通过增加剪切层的厚度来改变剪切层的稳态特性，如在开口的前沿喷射稳态射流或脉冲射流；
- 采用主动消声方式消除风振；
- 驱动剪切层偏离共振频率；
- 转换平均剪切层在开口下游的再附着位置。



在车窗前缘增加射流改变剪切层特性



主动消声方式消除风振影响

感谢聆听！

欢迎大家进行交流！